

AZ31マグネシウム合金圧延板の角筒絞り性に及ぼす
結晶粒径の影響渡辺 博行* · 向井 敏司*
鈴木 桂介** · 清水 亨**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 53, No. 2 (2003), pp. 50-54

Effects of grain size on deep drawability of AZ31
magnesium alloy sheets into square cupHiroyuki WATANABE*, Toshiji MUKAI*
Keisuke SUZUKI ** and Toru SHIMIZU**

The influence of grain structure on the formability of an AZ31 magnesium alloy rolled sheet was examined by deep drawing for five materials. Each sheet was formed at a drawing speed of 60 mm/min into a cup, which had a square bottom of $50 \times 50 \text{ mm}^2$, and a maximum depth of 18 mm. It was found that the materials with grain sizes of $\leq 10 \mu\text{m}$ could be formed to the maximum depth without cracking, even at the lowest temperature investigated (423 K). Tensile mechanical testing of the rolled sheets revealed that these materials with high drawability also had a high Lankford value at the forming temperature. In addition, the surface roughness at the corners of the deep drawn cup was somewhat reduced in the fine-grained materials. The present results suggest that a magnesium alloy sheet with a fine-grain structure has the potential for deep drawing at relatively low temperatures.

(Received May 27, 2002)

Keywords: magnesium alloy, rolled sheet, deep drawing, grain size, tensile properties

1. 緒 言

日本においてマグネシウムの採用が特に多い携帯電話筐体、ノートパソコン筐体や自動車・二輪車部品の成形にはダイカスト法やチクソモールド法の鋳造による技術が利用されている。しかしながら、材料歩留まりの向上、表面欠陥修正のための工程削減、さらには肉厚0.5 mm以下への薄肉化や高強度や高靱性化などの利点のために、展伸材を利用した塑性加工技術が注目されている。

板材の立体化成形法の中でも最も重要な塑性加工の手法である深絞り成形については、マグネシウム合金においても基礎的な研究が行われ、プレス成形適用の可否が検討されている^{1)~7)}。最近のAZ31合金に関する結果では、453 K付近の温度で限界絞り比(LDR)が2.2に達することが報告されている⁵⁾。さらに、パンチを水冷することにより、473 KにおけるLDRが3.2まで向上することが明らかになっている⁴⁾。このような深絞り能を利用して、最近ではミニディスクプレーヤ筐体の成形に適用されている⁸⁾。しかしながら、より低い温度で製品筐体として十分な深さまで成形可能な材料が開発できれば、マグネシウム採用の機会がさらに増大すると考えられる。h.c.p.構造を有するマグネシウムの機械的性質は、結晶粒径や集合組織の違いで大きく異なることが指摘さ

れており^{9)~15)}、これらの材料因子が深絞り性にも影響を及ぼすと予想される。しかしながら、これまでに深絞り成形性に及ぼす材料因子の影響について系統的に調査された例はない。

本研究では特に材料の結晶粒径の影響に着目し、より低温での深絞り成形を可能にする組織について検討することを目的とした。電気電子機器筐体の成形を念頭に置き、実製品に近い形状と加工速度を採用した。また実加工の際、成形後の塗装処理工程において問題になる成形品コーナ部の表面荒れへの影響についても調査した。

2. 実験方法

2.1 材料

AZ31合金の圧延板材を用いた。圧延は元板厚1 mmの押出材をトータルで50%圧下し、最終板厚を0.5 mmとした。圧延条件を変えることにより3種類の材料(GT材, FT材, およびCG材)を用意した。GT材およびFT材については、双晶を低減することを目的に圧延後に焼なまし(523 K, 1時間)を施し(それぞれGA材, FA材とする)、マイクロ組織の異なるのべ5種類の材料を用意した。それぞれの材料の圧延面のマイクロ組織をFig. 1に示す。ST面, LT面の観察から、いずれの材料も結晶粒は等軸であることが確認され

* 大阪市立工業研究所機械課 (〒536-8553 大阪府大阪市城東区森之宮1-6-50)。Osaka Municipal Technical Research Institute (1-6-50 Morinomiya, Joto-ku, Osaka-shi, Osaka 536-8553). E-mail: hwata@omtri.city.osaka.jp

** 大阪富士工業(Mg)事業部(尼崎市)。Mg Division, Osaka Fuji Corp. (Amagasaki-shi, Hyogo).

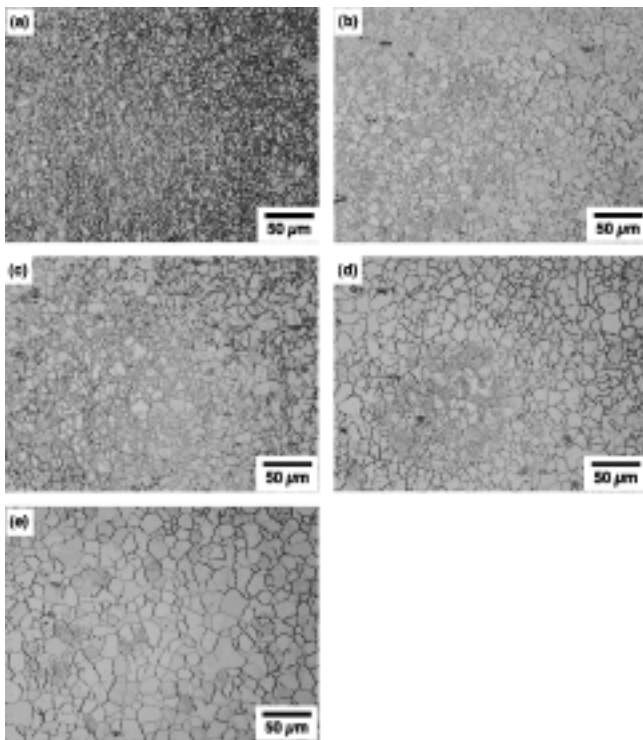


Fig. 1 Typical microstructures of the rolling plane for the (a) GT, (b) GA, (c) FT, (d) FA and (e) CG materials. The rolling direction is horizontal.

Table 1 Grain sizes of magnesium sheets used in the present study

Material	Grain size (μm)
GT	7
GA	10
FT	14
FA	16
CG	22

た。また、GT および FT 材は比較的低温で圧延を行ったため、組織中に双晶が観察される。それぞれの材料の結晶粒径を Table 1 にまとめた。なお結晶粒径の見積もりにおいては双晶は粒界としてカウントしていない。

2.2 深絞り成形

50 mm 角、深さが最大18 mm の角筒への深絞り性を評価した。Fig. 2 に示したような金型とパンチを用いた。絞り速度は、実加工速度の下限と考えられる60 mm/min とした。成形は、一般的に深絞り性が向上するとされている473 K⁹⁾とこれより低い温度の423 Kにおいて行った。圧延方向とパンチの辺方向が一致するようにブランクをセットした。ブランクの形状は、一辺が85 mm の正方形の頂点部分から一辺15 mm の三角形分を切り落とした八角形とした。後出の Fig. 4 の左端が成形前のブランクの外観である。ブランク、金型、パンチのすべてを設定温度に加熱する恒温成形とした。潤滑は、厚さ50 μm のテフロンシートでブランクの上下面をはさむことにより行った。しわ抑え荷重は、約1.4 kN とした。同じ成形条件で少なくとも2回の成形を行った。変

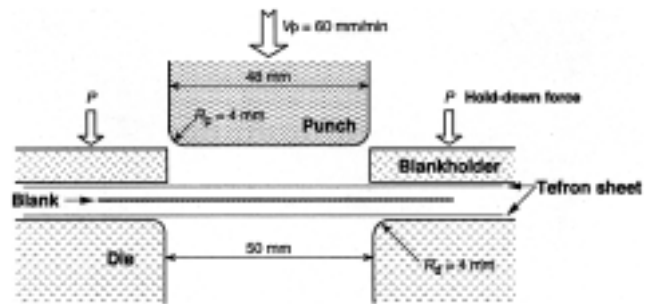


Fig. 2 Schematic illustration of the die and blank configuration for deep drawing of the magnesium sheet into a square cup.

形に伴う絞り荷重の変化は、パンチ上部に取付けた100 kN のロードセルにより測定した。

コーナ（頂点）部の表面荒れの状態をレーザ顕微鏡の光量モードにて観察し、合せて成形品コーナ部のマイクロ組織も観察した。

2.3 高温引張試験

深絞り成形を行った423および473 Kにおいて引張試験を行った。試験片は、引張方向が圧延方向と垂直になるように圧延板材から採取した。試験片の形状は、金属系超塑性材料の引張特性評価方法（案）¹⁶⁾に従い、平行部長さ18 mm、幅6 mm、肩部の半径3 mmとした。引張試験により、引張強さ（UTS）、破断伸び、加工硬化指数（ n 値）、ランクフォード値（ r 値）を見積もった。ひずみ速度は変形中常に $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ となるようにして行った。 r 値は、破断後の試験片について測定した。

また、GT 材および CG 材については面内異方性についても調査した。試験片は、引張方向が圧延方向と平行および45°になるように圧延板材から採取し、温度423 Kにおいて引張試験を行った。

3. 結果および考察

3.1 深絞り性

423 Kにおけるそれぞれの材料の絞り荷重と絞り深さの関係を図3(a)に示す。変位は2 mm ごとのオフセットで表示している。絞り荷重は変形とともに大きくなり、10~12 mm の変位で最大値を示した。成形時の最大荷重は材料による大きな差異はなく、すべての材料において7.6 kN 程度であった。ただし、成形量の小さいFA 材および CG 材では軟化を示す前に割れが発生した。Fig. 4（中央）に423 KでCG 材を成形したサンプルの外観を例として示す。FT 材、FA 材の場合も同様であったが、フランジ部にはしわの発生や割れは観察されなかったが、図中の矢印で示したとおりコーナ部に割れが発生したことで、18 mm の目標深さまで成形することができなかった。Fig. 5に423 Kにおいてき裂が生じることなく成形できた絞り深さを材料ごとにまとめた。材料に依存して成形限界に違いが認められた。成形性が良好であったGT 材および GA 材は、試験を行った2 試料とも18 mm 深さまで成形ができた。しかし、これ以外の材料では、複数回の試験によっても18 mm 深さまで成形することができなかった。FT 材、FA 材、CG 材の順で成形性が低下する傾向が見られた。

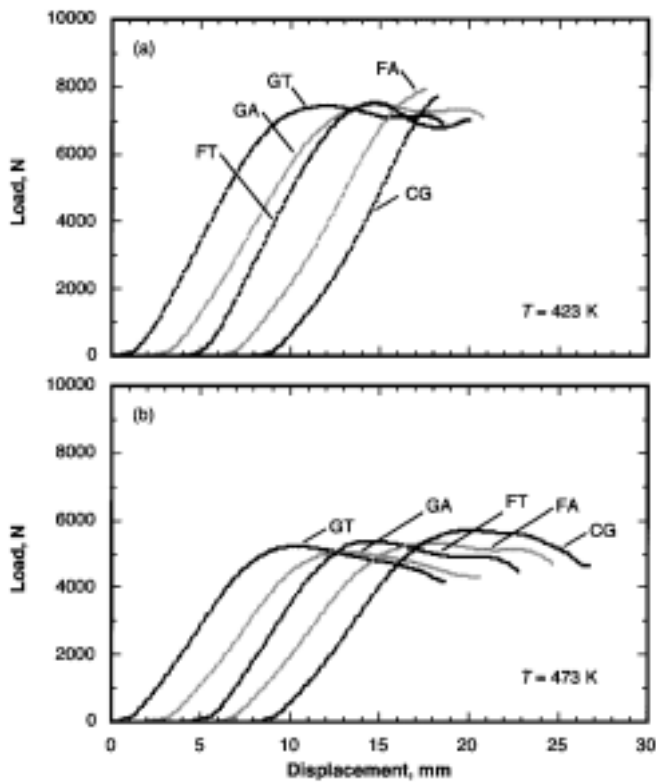


Fig. 3 Load-displacement curves during deep drawing of the magnesium sheets at (a) $T=423$ K and (b) $T=473$ K.

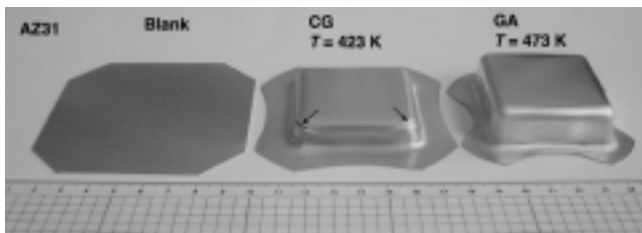


Fig. 4 Appearances of blank (left), the part formed at 423 K using the CG material (center), and the part formed at 473 K using the GA material (right). Cracks are indicated by the arrows.

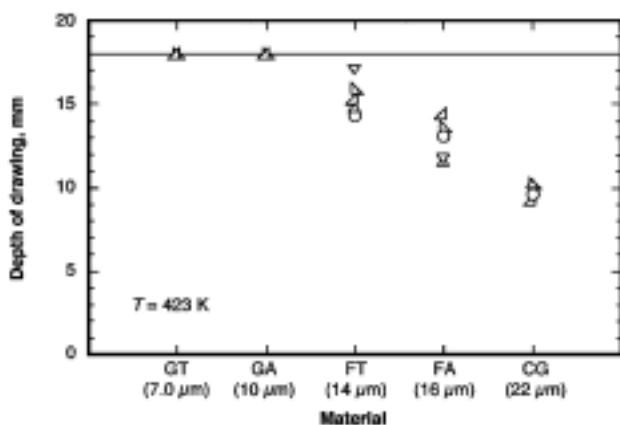


Fig. 5 The depth of the drawing, below which the cracks were not formed, for five magnesium sheets at a temperature of 423 K.

473 K においては、検討したすべての材料で18 mm 深さまで成形が可能であった。Fig. 4 (右端) に473 K でGA 材を成形したサンプルの外観を例として示した。フランジ部のしわやコーナ部に割れが発生することなく、目標深さまで成形できている。Fig. 3 (b) に絞り荷重と絞り深さの関係を示す。473 K においても材料による成形荷重の違いは顕著ではない。成形荷重は423 K の場合と比較して減少し、最大値は5.3 kN 程度であった。

成形性に関しては、423 K の温度においてのみ材料の有意差が現れた。結晶粒径に着目して成形性を振り返ってみると、423 K で得られた成形性は、結晶粒径とよい相関を示していることが明らかである。すなわち、微細な結晶粒を有する材料ほど深絞り成形性に優れている。

一方、組織中の双晶の有無に着目すると、GT 材は多くの双晶を含むにもかかわらず423 K において最も良好な成形性を示した。GT 材を焼なましして得られたGA 材と比較しても、同程度の成形性が得られている。FT 材とこれを焼なましして得たFA 材では、焼なましをしていないFT 材の方がむしろ良好な成形性が得られている。すなわち、双晶の存在は深絞り性に大きな影響を及ぼしていないと考えられる。従来、プレス成形にはO 材が一般的に使用されているが、必ずしも焼なましは必要ないことが示唆される。

双晶の存在による影響は顕著ではなかったことから、結晶粒の微細化が、より低い温度域での深絞り成形を可能にする材料の開発に際しての指針であると結論される。

成形後のコーナ部の表面を観察した結果を Fig. 6 に示す。成形は473 K に行っている。製品として用いられる場合に行われる後工程の塗装処理には影響がない程度であると

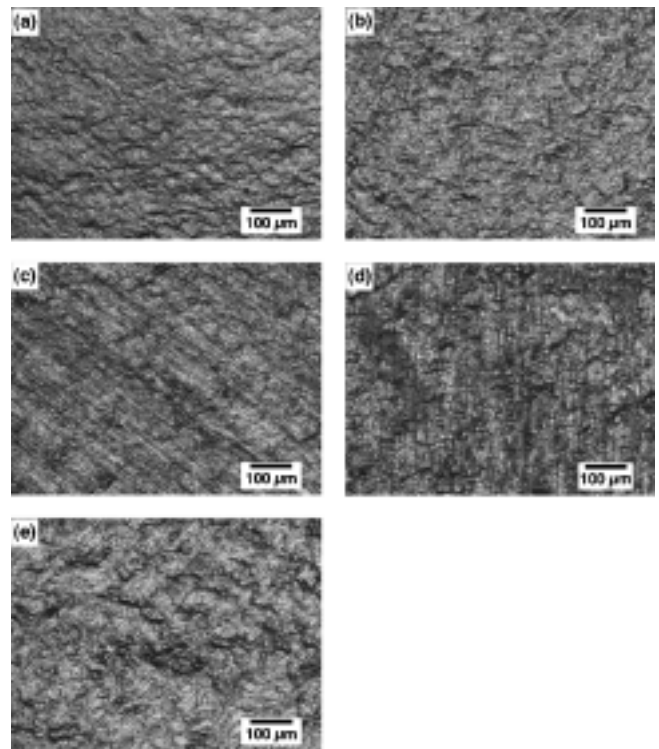


Fig. 6 Surface appearances at the corners of the formed cup for the (a) GT, (b) GA, (c) FT, (d) FA and (e) CG materials. The forming was carried out at 473 K.

判断されるものの、すべての材料で成形に伴う荒れが観察された。GT, GA, FT, FA 材の場合、表面は比較的フラットであったのに対して、最も粗大な結晶粒を有する CG 材では凹凸が幾分顕著であった。423 K で18 mm 深さまで成形可能であった GT 材と GA 材のコーナ部の表面は、GT 材の表面荒れが幾分顕著になっていたものの、473 K で成形した CG 材のそれよりは小さかった。

成形品のコーナ部のマイクロ組織を観察した結果を Fig. 7 に示す。成形は473 K で行っている。成形前にはなかった微細な結晶粒が観察された。引張試験において変形に伴う組織の変化を観察したところ、変形中に微細な結晶粒が形成されていることが確認された。このような組織変化は、たとえば GA 材の場合、真ひずみ0.23においてすでに起こっていた。引張試験の結果から判断して、成形品コーナ部で観察された微細結晶粒も成形中の動的再結晶により形成されたと考えられる。成形前の結晶粒が小さいほど新しく形成された結晶粒

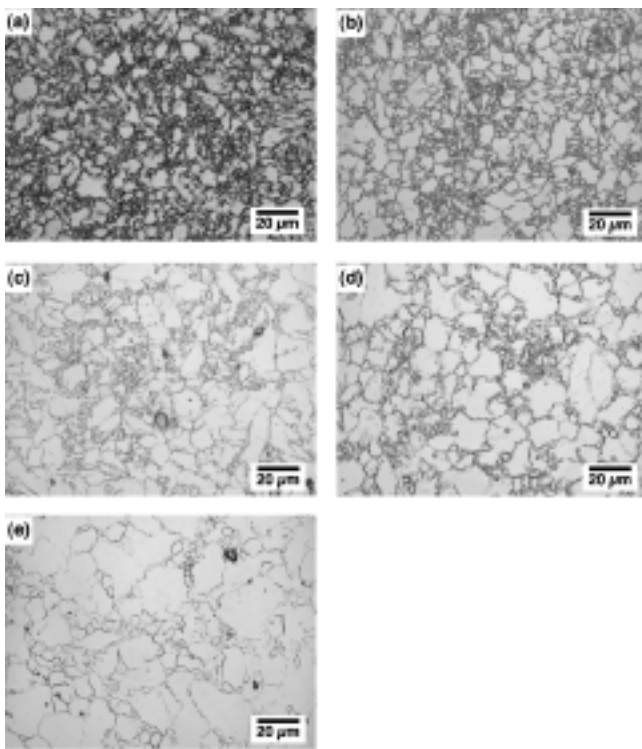


Fig. 7 Typical microstructures at the corners of the formed cup for the (a) GT, (b) GA, (c) FT, (d) FA and (e) CG materials. The forming was carried out at 473 K.

も小さい傾向にあり、GT, GA 材では1 μm 程度、FT, FA 材では1.5 μm 程度、CG 材では2.5 μm 程度であった。この再結晶の傾向は、AZ31合金の高温自由鍛造で観察された結果と同様であった¹⁷⁾。また、成形前の結晶粒径が小さいほど微細化された領域の割合は大きくなる傾向にあった。このような組織変化は直辺部でも観察されたが、コーナ部ほど顕著ではなかった。

一般的に、加工ひずみによって起こる表面荒れに及ぼす主因子として結晶粒径があり、結晶粒が微細なほど表面荒れが小さくなる傾向がある¹⁸⁾。よって動的再結晶による結晶粒微細化は表面荒れの抑制につながっていると考えられる。深絞り性のみならず、成形後のコーナ部の表面荒れの抑制という観点からも結晶粒が微細な材料の方が深絞り用素材として望ましいと考えられる。

3.2 高温引張特性

一般的に、深絞り成形性が良好な材料の引張特性における指標として、伸びが大きいこと、 n 値が大きい（フランジ部は耐力が低く、成形過程で側壁部の強度が高くなる）こと、 r 値が大きいことが挙げられている¹⁹⁾。本研究では、深絞り成形を行った温度において引張試験を行い、引張強さ、破断伸び、 n 値、 r 値を比較した。Table 2 に、引張方向が圧延方向と垂直な試験片におけるそれぞれの値をまとめた。参考のために、表には相田ら⁴⁾の AZ31（結晶粒径：10~20 μm ）における結果も示している。

引張強さは、温度の上昇とともに減少しており、材料による大きな違いは認められなかった。破断伸びは、423 K では材料の違いにより65から71%の値を、473 K では66から83%の値を示している。473 K では材料による伸び値の差が大きくなってはいるが、強度と同様に材料による違いは小さかった。よって、深絞り成形性の評価は、単に一軸引張試験の強度や破断伸びから判断することが困難であると考えられる。

n 値は、FT 材で423および473 K いずれの温度でも0.1以下の低い値を示した。それ以外の4種類の材料では、0.25から0.32の比較的高い値であった。良好な成形性を示した GT 材は、最も成形性が劣った CG 材と423 K において同程度の値を示している。FA 材は FT 材と比較して高い加工硬化を示し、焼なましによると思われる影響が観察された。しかし FT 材は比較的低い n 値にもかかわらず、423 K において3番目により成形性を示した。以上の結果から考えて n 値が深絞り性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

r 値は、温度の上昇とともに減少する傾向がすべての材料で観察された。473 K ではすべての材料で、1.8程度の値が

Table 2 Tensile properties of magnesium sheets at elevated temperatures. Tensile direction is 90° to the rolling direction

Material	UTS (MPa)		Elongation (%)		n -value		r -value	
	423 K	473 K	423 K	473 K	423 K	473 K	423 K	473 K
GT	174	125	71	83	0.26	0.28	3.45	1.90
GA	175	124	71	75	0.32	0.26	5.41	1.87
FT	190	132	66	66	0.01	0.05	2.58	1.71
FA	171	122	66	78	0.28	0.26	2.65	1.75
CG	172	123	65	66	0.26	0.30	2.27	1.78
AZ31 ⁴⁾	186	111	76	81	0.15	0.02	2.71	1.66

Table 3 The variation in r -value against tensile testing angle to the rolling direction at a temperature of 423 K

Material	0°	45°	90°
GT	2.05	2.35	3.38
CG	2.03	1.59	2.27
AZ31 ⁴⁾	2.08	1.39	2.67

得られ、素材の違いによる差は認められなかった。しかしながら、423 K では、良好な深絞り成形性の得られた GT 材、および GA 材において特に大きくなっており 3 以上の値が得られた。

成形性の良好であった GT 材および、最も成形性に劣った CG 材について 423 K での r 値の面内異方性を調べた結果を Table 3 にまとめた。調査したいずれの角度でも GT 材における値は 2 以上となった。平均塑性ひずみ比 ($\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$) は、GT 材および CG 材でそれぞれ、2.53 および 1.87 と算出され、GT 材の値は相田らの材料⁴⁾におけるそれ ($\bar{r} = 1.88$) よりも大きかった。ところで、CG 材や相田らの材料⁴⁾では、圧延方向と 45° になるように採取した試験片での r 値が、0° および 90° 方向と比較して小さくなる傾向があったが、GT 材においては 90°, 45°, 0° の順で小さくなり、従来の結果と異なる傾向となった。このため、GT 材の 0° 方向での r 値は CG 材や相田らの材料とはほぼ同じ値となった。

コンカルカップ試験²⁰⁾は、板材の深絞りりと張出しの複合成形性を評価するが、菅又ら²¹⁾は AZ31 合金の高温における引張特性とコンカルカップ値について相関を調査している。この研究において、全伸びが 60% 以下では破断伸びの増加とともにコンカルカップ値が比例して減少（成形性が向上）するが、全伸びが 60% 以上では、伸びの増加にもかかわらずコンカルカップ値は変化しないことが報告されている。本研究でも、深絞り成形性の違いにもかかわらず、引張伸びがほとんど変わらなかったのはこのためであると考えられる。一般に、ある程度以上の延性のある材料の深絞り成形における LDR は、 r 値にほぼ比例することが知られている²²⁾。よって、マグネシウム合金の場合も、成形条件（温度・速度）が同じであれば、 r 値の高い材料ほど成形性がよいと判断できる。

4. 結 言

マグネシウム合金においてより低温での深絞り成形を実現するための材料開発の方向性を、特に結晶粒径の違いに着目して検討した。結晶粒径の異なる 5 種類の AZ31 合金圧延板材を用いて角筒深絞り成形と引張試験を行った。

(1) 473 K ではすべての材料において良好な深絞り成形性が得られた。423 K では 10 μm 以下の結晶粒径を有する材料においてのみ良好な深絞り成形性が得られた。十分な成形性の得られなかった材料では、コーナ部より割れが発生した。

結晶粒径の違いにより深絞り成形性が異なることが明らかになった。

(2) コーナ部の表面荒さは、最も粗大な結晶粒を有する材料において幾分大きかった。また、すべての材料のコーナ部で動的再結晶によると考えられる微細結晶粒が観察された。動的再結晶による結晶粒の微細化が表面荒れの抑制につながっていると推測された。

(3) 高温引張試験においては成形性の違いにもかかわらず、強度や破断伸びに大きな差異は認められなかった。しかしながら、423 K においても良好な成形性を示した材料においては、他の材料と比較して高い r 値を示し、成形条件が同じであれば、マグネシウム合金でも他の金属材料と同様に r 値が深絞り成形性を評価する指標として利用できることが示唆された。

(4) より低い温度域での深絞り成形性を向上させるには、成形限界や表面荒れの観点から、結晶粒がなるべく微細な材料を用いることが望ましいと結論される。

参 考 文 献

- 1) 軽金属協会マグネシウム委員会：マグネシウム合金展伸材の標準性質測定に関する研究，軽金属協会，(1962)。
- 2) H. Takuda, T. Yoshii and N. Hatta: J. Mater. Process. Technol., 89-90 (1999), 135.
- 3) 西村 尚：マグネシウム合金板材の成形加工と表面処理，日本塑性加工学会北陸支部・第46回技術懇談会テキスト，日本塑性加工学会北陸支部，(2000)，1。
- 4) 相田取平，田辺 寛，須貝裕之，高野 格，大貫秀樹，小林勝：軽金属，50 (2000)，456。
- 5) H. Somekawa, M. Kohzu, S. Tanabe and K. Higashi: Mater. Sci. Forum, 350-351 (2000), 177.
- 6) 戸澤康壽：軽金属，51 (2001)，492。
- 7) 向井敏司，東 健司：塑性と加工，42 (2001)，99。
- 8) 清水 亨：アルトピア，31, No. 4 (2001)，p. 41。
- 9) K. Kubota, M. Mabuchi and K. Higashi: J. Mater. Sci., 34 (1999)，2255。
- 10) 金子純一，菅又 信，沼 政弘，西川泰久，高田秀男：日本金属学会誌，64 (2000)，141。
- 11) T. Mukai, M. Yamanoi, H. Watanabe and K. Higashi: Scripta Mater., 45 (2001)，89。
- 12) T. Mukai, M. Yamanoi, H. Watanabe, K. Ishikawa and K. Higashi: Mater. Trans., 42 (2001)，1177。
- 13) 大年和徳，勝田基嗣：軽金属，51 (2001)，534。
- 14) M. Mabuchi, Y. Chino, H. Iwasaki, T. Aizawa and K. Higashi: Mater. Trans., 42 (2001)，1182。
- 15) 吉田 雄，山田英明，鎌土重晴，小島 陽：軽金属，51 (2001) 556。
- 16) 平成9年度 通商産業省工業技術院委託 石油代替電源用新素材の試験・評価方法の標準化に関する調査研究成果報告書 (平成10年3月)，ニューマテリアルセンター，p. 81。
- 17) H. Watanabe, H. Tsutsui, T. Mukai, K. Ishikawa, Y. Okanda, M. Kohzu and K. Higashi: Mater. Trans., 42 (2001)，1200。
- 18) 金属加工，日本金属学会，(1986)，p. 134。
- 19) 日本塑性加工学会編：プレス加工便覧，丸善，(1975)，302。
- 20) コンカルカップ試験方法，JIS Z 2249 (1963)。
- 21) 菅又 信，金子純一，沼 政弘：塑性と加工，41 (2000)，233。
- 22) 河合 望：塑性加工学，朝倉書店，(1973)，p. 213。